

A szárazmegmunkálás folyamatjellemzőinek és a megmunkált felület minőségének vizsgálata keménysztergálásnál

A keménysztergálás, amelynél a forgácsolás 55 HRC-nél keményebb acélon, néhány ezred vagy század mm² keresztmetszetű forgács, 100...200 m/min sebességű, megmunkálási segédanyag nélküli, ún. „száraz” anyagleválasztás történik, a precíziós forgácsolás kategóriájába tartozik. E minőségben a gépalkatrészek egy jól körülhatárolható nagy csoportjának készre-munkálásánál a köszörülés alternatív eljárása lett. Példátlanul gyors ipari terjeszkedése azzal magyarázható, hogy termelékenysége a köszörüléshez képest többszörös, műveleti önköltsége pedig fele akkora. Mindezek mellett a köszörüléssel ellentétben környezetbarát tiszta technológia, mert nem igényel hűtő-kenő folyadékot. Alkalmazásának azonban több korlátozó tényezője van. A kutatóknak azonban, beleértve saját magunkat is, hamarosan fel kellett ismerni, hogy az eddigi szerszámanyagokra a forgácsolás-elméletben megfogalmazott törvényszerűségek a forgácsleválasztásra alkalmazott sokkristályos CBN szerszámokra csak jelentős megkötésekkel vagy nem érvényesek. A nagykeménységű anyag forgácsolására - amelyet intenzívebb hőhatás, igen magas kontakt hőmérséklet, kis forgácskeresztmetszet, de nagy forgácsolósebesség jellemez - nem lehet a forgácsolás-elmélet meglévő törvényszerűségeinek, képleteinek, szabályainak érvényességét kiterjeszteni, hanem újakat kell kidolgozni. Ennél fogva a keménysztergálás kutatása és fejlesztése új fejezet megírását jelenti a forgácsolás elméletében és gyakorlatában.

Kutatómunkánkat a 2003-ban elkészített „Kutatási terv” szerint végeztük, a vállalt feladatokat teljesítettük. A kutatási eredményeket hazai és külföldi konferenciákon, hazai és külföldi folyóiratokban, kiadványokban, könyvfejezetben rendszeresen közzétettük. (A közlemények jegyzékben megadottakon túl, öt db cikk lett leadva Impakt faktorral rendelkező folyóiratokhoz). Az eredmények felhasználásával 1 PhD értekezés elkészült és megvédésre került, egy másik pedig készülöben van. Mindezek figyelembevételével az alábbi részmakörök szerint foglaljuk össze eredményeinket.

1. *A hűtés-kenés elmaradásának hatása a folyamatjellemzőkre*
2. *Hőátviteli folyamat modellezése keménysztergálásra*
3. *Hűtés elmaradás hatása a forgácsoló erőre*
4. *A forgácsleválasztás hatása a pontosságra*
5. *Forgácsleválasztás hatása az érdességre*
6. *A felszíni réteg mikrokeménysége*
7. *Fehér réteg kialakulásának vizsgálata*
8. *A felületi réteg nem kívánatos változásait kizáró feltételrendszer megadása.*
9. *Módszer a megengedett szerszámkopás meghatározására, az előírt érdesség alapján*
10. *Kritériumrendszer a megmunkáló eljárás megválasztásához*

1. A hűtés-kenés elmaradásának hatása a folyamatjellemzőkre

Megállapítottuk, hogy a hűtés-kenés elmaradása növeli mind a munkadarab mind a szerszám hőterhelését, és változásokat okoz a keménysztergálás folyamatjellemzőiben. Edzett acéloknak nagysebességű keménysztergáláskor a felszíni réteg jelentős hő- és mechanikai igénybevételt szenved. A keletkező hő- és hőmérsékletváltozás hatással van a forgácsolási folyamatra, a forgácsképződésre, a szerszámra és a munkadarabra is. Ezért a hőtani jellemzők mellett megvizsgáltuk a forgácsolóerő alakulását, a forgácsdeformáció jellegzetességeit és a szerszám kopási folyamatát. E változások mértékét a felületi érdesség és a felületi réteg állapotának többirányú vizsgálata alapján is bemutattuk. [1, 3, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 24, 50, 51, 56]

Az alkatrészek funkcionális viselkedését döntően befolyásoló kézmunkáló eljárások a keménysztergálás és a köszörülés. Ezen eljárásoknál is, - ahogyan a többi anyagszétválasztó eljárásnál - a fémmegmunkáló iparban a hűtő-kenő folyadékok a legnagyobb mennyiségben alkalmazott, és legnagyobb költségtényezőt jelentő segédanyagok. Segítik az előírt pontosságú és az elvárt felület-integritású munkadarabok megvalósítását, továbbá a forgácsoló szerszámok megfelelően hosszú (optimális) élettartamának fenntartását. Ezért hosszú ideig az alkalmazásuk nélkülözhetetlen volt. Az utóbbi évtizedekben a környezetünk védelmének fontossá válásával azonban a hűtő-kenő folyadékok szerepének megítélése gyökeresen megváltozott, mert az elhasználandó hűtő-kenő folyadék „veszélyes hulladék”, és reciklálásuk egyelőre nehéz vagy megoldhatatlan. Ezért ma már a műveletek megválasztásának eddig alkalmazott szempontjai (pontosság, felületminőség, gazdaságosság, stb.) kiegészülnek a környezetvédelem szempontjaival.

Vannak olyan forgácsoló eljárások, amelyeknél a felhasznált segédanyagok mennyiségét nem lehet csökkenteni, s vannak, amelyeknél különféle módszerekkel lényegesen csökkenteni lehet (minimálhűtés, vagy minimál-kenés módszer). A keményfelületek megmunkálására alkalmazott abrazív

eljárások nagy mennyiségű hűtő-kenő folyadékot igényelnek. Az eljárások e csoportjához viszonyítva a keménysztergálással való helyettesítés nullára csökkenti a hűtő-kenő anyag szükségletet.

A vizsgálatokat körültekintően terveztük meg, hiszen egy bevált - elméletében jól kidolgozott és technikájában kiválóan megvalósított, folyamatában jelentősen eltérő forgácsoló eljárást – kívánunk újjal helyettesíteni vagy kiváltani. A kiválthatóságát alapvetően meghatározza, hogy tudjuk-e kezelni a hűtő-kenő folyadék funkcióinak elmaradását. Ez hatással van a megmunkáló rendszer működésére, és befolyásolja annak hőtechnikai egyensúlyát. A hűtés elmaradása miatt a keletkezett hőmennyiségnek sokkal nagyobb része marad a rendszerben, így mind a munkadarabnak, mind a szerszámnak nagyobb lesz a hőterhelése. Más a hőátadás intenzitása is. Mozgó hőforrásról lévén szó, köszörülésnél viszonylag kicsi (10-20 m/min), keménysztergálásnál nagyobb (több mint tízszerese) a hőforrás haladási sebessége. Vizsgáltuk különféle technológiai adatok mellett a hőátviteli folyamatokat és a kapott eredményeket kísérleti úton ellenőriztük. A hűtés-kenés elmaradásának hatását ill. a hőhatás következményeit a forgácsképződés szempontjából, a munkadarab tekintetében és a szerszám vonatkozásában vizsgáltuk.

A forgács deformációról széleskörű szakirodalom áll rendelkezésre, de hiányzik a megmunkált felület geometriai jellemzőit figyelembe vevő modell. Pedig például a furatok megmunkálása csaknem olyan gyakori, mint a külső felületeké. Ezért a forgácsleválasztás leírására a felület geometriai jellemzőit figyelembevevő kinematikai modellt is kidolgoztunk, amely a belső, külső felületeket és azok átmérőváltozásait veszi figyelembe.

2. Hőátviteli folyamat modellezése keménysztergálásra

Végesdifferencia módszerrel elvégeztük a munkadarab (furat, palást és homlokfelületek) hőmérséklet terének numerikus vizsgálatát. Az eredmények pontosságának növelése érdekében a FLUENT végestérfogatok szoftvert is alkalmaztuk a hőmérséklettér meghatározására és vizualizálására. [12, 13, 14, 17, 40, 41, 44, 57, 58]

A befejező megmunkáláshoz bármely megmunkálási eljárást is választjuk, mind a folyamatjellemzőket, mind a megmunkált felületet és a felület alatti rétegek tulajdonságait is befolyásolják a forgácsolás hőjelenségei. Az anyagleválasztással történő fémmegmunkáló eljárásoknál a bevezetett mechanikai energia szinte teljes egészében hővé alakul át. A készülő munkadarabok felületén ezért a mechanikai és a hőigénybevétel megváltoztatja a külső réteg eredeti állapotát, más szóval integritását. Fokozott mértékben történik ez az újabb, nagy hatékonyságú intenzív eljárásoknál, például a CBN szerszámmal szárazon végzett forgácsolásnál. A forgácsolási alakítás igen gyors, így az eközben bekövetkező felhevülés rövid idő alatt megy végbe. A hőhatások vizsgálata hosszú és költséges, ezért nagy jelentősége van a modellezésen alapuló szimulációs vizsgálati módszereknek.

A szimulációs módszerek kidolgozásakor először a kés és a munkadarab közötti háromdimenziós nemlineáris instacionárius hőátviteli folyamat vizsgálatához szükséges differenciálegyenletet, ill. a kezdő és peremfeltételi egyenletek írtuk fel. Valamennyi általunk végzett vizsgálat során a munkadarabot állónak tekintettük, a kést pedig a megmunkált felületen mozgó felületi hőforrásként modelleztük. A munkadarab és környezet közötti hőcserét konvektív hőátvitelként modelleztük, és a munkadarab forgását a munkadarab és a környezet között értelmezett hőátviteli tényező megválasztásánál vettük figyelembe. Meghatároztuk a számítások anyagállandóit, részben szakirodalmi adatokra, részben saját kísérleti eredményekre támaszkodva előírtuk a kezdeti és peremfeltételi egyenletekben szereplő értékeket. A számítási egyenleteit úgy írtuk fel, hogy a külső és belső palástesztergálásnál illetve az oldalfelületek megmunkálásánál is alkalmazhatók legyenek. A hőátviteli folyamatot leíró parciális differenciálegyenlet megoldására több módszert is alkalmaztunk, nevezetesen a végesdifferencia-módszert és a végestérfogatok módszerét. A végesdifferencia módszer kidolgozása során a forgásszimmetrikus munkadarabok miatt henger koordináta rendszert használtunk. Először diszkrétizáltuk a munkadarabban a hő terjedését leíró háromdimenziós nemlineáris instacionárius Fourier-hővezetési egyenletet. A diszkrétizáció során az explicit rácsmódszert alkalmaztuk. A megmunkált felületen mozgó kés miatt minden esetben háromdimenziós diszkrétizációs modellt alkalmaztunk. A gyors megmunkálási sebesség miatt igen sűrű rácsosztást és időlépést kellett a megmunkált felület közelében alkalmazni és a kapott nagyméretű adatfájl kezelése és a számítási eredmények feldolgozása, vizualizálása is igen munkaigényes volt.

Főleg az utóbbiak megkönnyítése miatt a modellezést a FLUENT áramlástechnikai modellező programmal is elvégeztük. A Fluent széles körben alkalmazott, felhasználóbarát, kereskedelmi forgalomban megvásárolható, Microsoft Windows operációs rendszeren vagy Linux alatt is futtatható CFD (Computational Fluid Dynamics) program. A Fluent a számítási tartományt véges számú térfogathálókra osztja fel, és a cellák középpontjába redukálja a fizikai mennyiségeket (hőmérséklet, sűrűség, stb.), amelyek értékét a megmaradási mérlegegyenletekből határozza meg. A megmaradási

tételek integrál-egyenletek formájában értelmezi, az egyenletekben szereplő integrálokat numerikus kvadraturák segítségével számítja ki. A numerikus algoritmus precíz, nagy pontosságú számítást tesz lehetővé, a megfelelő hibakorlát megadásával a számítási pontosság előre definiálható. Az eljárás részét képező iteráció lépéseinek számával a számítás pontossága javul. Egy iteráció futási ideje nagyban függ az elemszámtól, és a felhasznált hardver teljesítményétől. Ezzel a módszerrel stacionárius és instacionárius vizsgálatok is elvégezhetőek. A Fluent több modulból épül fel. Egyik része a GAMBIT nevű programcsomag, amelyben a forgácsolandó munkadarab, háromdimenziós geometriai modelljét és a modell számítási rácsát készítjük el. A keménysztergálás modellezése a FLUENT-tel többféle módon is megvalósítható. Az általunk választott megoldásnál az anyagleválasztást nem modelleztük, a munkadarabot állónak tekintettük és a szerszámmal való érintkezés helyénél fejlődő hő mozgó felületi hőforrással bevitt hőmennyiséggel helyettesítettük. A szerszám és a munkadarab érintkezési helyén a felületi hőmérsékletet és a munkadarabra érkező hőáram értékét is állandónak tekintettük, de lehetőség van ezen értékek más módon való megadására is. A FLUENT-tel való modellezést, amelynek célja keménysztergáláskor kialakuló hőmérséklettér meghatározása volt, külső és belső hengeres felület illetve homlokfelület keménysztergálásra is elvégeztük. A modell segítségével kiszámítható volt a hőmérsékletváltozás sebessége, egyrészt sugárirányban, másrészt alkotómentén az előtolósebesség irányában. A számítási eredményekből meghatározható a hő által befolyásolt felszíni réteg vastagsága, továbbá tetszőleges hőmérsékletű hőhatási övezetek a munkadarab belsejében, illetve az equipotenciális (azonos hőmérsékletű) felületek a szerszámnak bármely tetszőleges helyzetében.

3. Hűtés elmaradásának hatása a forgácsolóerőre

A hagyományos forgácsolástól eltérően keménysztergálásnál a fogásvétel irányú (F_p) forgácsolóerő nagysága meghaladja az F_c értékét. Ennek mértéke a forgácskeresztmetszet függvénye. Az anyagleválasztáshoz szükséges erők nagysága és eloszlása, valamint az erőkomponensek arányának megváltozása új erő-modell kidolgozását igényelte. [17, 19, 20, 21, 32]

Keménysztergálásnál lényegesen nagyobb forgácsoló erő keletkezik, mint például keménymémmel való esztergálásnál, azonos forgácskeresztmetszetet feltételezve. A többszörös fajlagos érték mellett a másik jellegzetesség, hogy eltérően a hagyományos szerszám-anyag párosításoktól, a felületre merőleges, úgynevezett passzíverő (F_p) lényegesen nagyobb lehet, mint az (F_c) főforgácsolóerő. Méréseink szerint az F_p/F_c hányados 1 és 3 között van, és a változását meghatározóan a forgácskeresztmetszet befolyásolja.

E különleges erőviszonyok a forgácsleválasztás sajátos körülményeivel magyarázható. Nagy negatív homlokszög ($\gamma = -26^\circ$ -ig), az igen kis forgácskeresztmetszet ($A_c = 0,02 \dots 0,04 \text{ mm}^2$); a változó forgácsvastagság egy h_{\min} -t is elérő (elméletileg esetleg még kisebb) értékei; a sokszor nagy élsugár (r_β); az anyag keménysége ($>55 \text{ HRC}$) a legfőbb okozói ennek.

Erőméréseink adatait a forgácsolási adatok (v_c , a_p , f) és a hátkopás függvényében diagramok formájában is ábrázoltuk. A tapasztalatok és mérési adatok alapján elkészítettük a forgácsolóerő mindhárom komponensének regressziós modelljét, melyben a forgácsolási adatok mellett a szerszámkopás hatását is figyelembe vettük.

4. A forgácsleválasztás hatása a pontosságra

Megállapítottuk, hogy a vizsgált alkatrészekben a precíziós megmunkálásokra előírt méret- és alakpontosság, megfelelően megválasztott technológiai adatok mellett keménysztergálással ugyanúgy elérhető, mint köszörüléssel. E megállapítást keménysztergált és köszörült furatok méretpontosságának, köralak pontosságának, hengerességének és az alkotók párhuzamosságának sorozat-mérései valamint a terheléstől függő- és terheléstől független hibaokozók elemzése alapján tettük. Az elvégzett vizsgálatok alapján – melyeket az alábbiakban röviden ismertetünk - megtervezhetőek azok a forgácsolási adatok, amelyek ajánlhatóak precíziós megmunkálásra. [4, 11, 20, 23, 30, 31, 36, 37, 53, 60]

A pontosság versenyképességi tényező és fontos minőségi mutató. Ezért a keménysztergálásnál a köszörüléssel való összevetésben kulcsfontosságú tényező. Keménysztergálásnál az elérhető pontosságot négy jellegzetes sajátosság befolyásolja: a lényegesen nagyobb forgácsolóerő, a hűtőkenő folyadék elmaradása, a pontszerű alakleképzés és a minimális fogásmélység szükségessége. Emiatt a keménysztergálás lényegesen intenzívebb anyagleválasztó folyamat, mint a köszörülés.

A pontosságot meghatározó véletlen hibaforrások nehezebben kezelhetők, mint köszörülésnél. A hibaforrások hatásának csökkentése a megmunkáló rendszer merevségének növelésével csökkenthető.

A mért darabokat sorozatgyártásból kiemelten vizsgáltuk be méretpontosság, köralak-pontosság, hengeresség és az alkotók párhuzamossága szempontjából. A pontossági méréseket keményszertergált és köszörült furatokon egyaránt elvégeztük. A mérések alapján a vizsgált fogaskerek furataiban a rajzokon előírt IT6-os pontosság igen nagy biztonsággal betartható. A keményszertergán lévő automatikus méretkorrekció lehetőségét kihasználva az IT5-ös pontosság is biztonságosan tartható.

A köralakhibát a munkadarab merevségére jellemző $d_{láb}/d_1$ (lábkörátmérő/furatátmérő) hányados függvényében vizsgáltuk. A $d_{láb}/d_1=2,83$ arányú elég merevnek tekinthető darabokon a köralakhiba biztonsággal, míg a $d_{láb}/d_1=1,34$ arányú kerekknél már nem tartható. Ennek oka a befogókészülék ide már nem megfelelő szorítási módja és szorító ereje. A hengerességi hibák mérési adatai is a $d_{láb}/d_1$ hányados fontosságát támasztották alá. A legnagyobb értéknél a hengerességi hiba a 0,004 mm-t sem érte el, viszont az 1,34-es értéknél ennek a 3...4-szeresére ugrott fel, igen nagy szórás mellett. Az alkotók párhuzamossági hibája a furatokban igen alacsony értékű: nem lépi túl az 1...3 μm -t.

A köszörüléssel való összehasonlíthatóság miatt számos párhuzamos mérést végeztünk köszörült és esztergált munkadarabokon. Általános tapasztalat, hogy a köralakhiba és a hengerességi hiba 1...2 μm -el nagyobb keményszertergálásnál, mint köszörülésnél. Az alkotók párhuzamossága viszont keményszertergálásnál jobb 1...2 μm -el. A nagyobb köralakhiba és hengerességi hiba azonban megfelel az IT5 minőséghez előírtaknak. A homlokfelületek síklapúsági hibája keményszertergálásnál kisebb, és megfelel az előírtaknak. A homlokfelületek síklapúsági hibája köszörülésnél is megfelelő, de értéke ötször nagyobb, mint keményszertergálásnál.

A vizsgálatokból megállapítható, hogy a keményszertergálás pontosságának legkritikusabb eleme a köralakhiba. A nem kellően merev darabok megfogásához ezért javasoltuk a koncentrált erő helyett megoszló erővel, szorító mágneses vagy vákuumos befogó készülék alkalmazását. A többi alakhűségi és helyzetpontossági előírás az adott gyártórendszerrel IT5 minőség esetében is biztosítható. Köszörülésnél a homlokfelületek síklapúsága és ütése a kritikus, mintegy 4...5-ször nagyobb, mint keményszertergálásnál.

5. Forgácsleválasztás hatása az érdességre

Megállapítottuk, hogy a hűtés-kenés elmaradása változásokat okoz a megmunkált felület minőségében. E változások mértékét a felületi érdesség (2D és 3D jellemzők) és a felületi réteg állapotának többirányú vizsgálata alapján mutattuk be. Meghatároztuk szárazmegmunkálásra azokat a forgácsolási adatokat és technológiai feltételeket, melyekkel azonos vagy jobb érdességet (simaságot) lehet elérni, mint köszörülésnél. [6, 7, 8, 10, 11, 22, 33, 35, 38, 42, 43, 59]

A munkadarabok felületi minőségének vizsgálata azért fontos, mert – mint már volt róla említés - edzett acéloknak nagysebességű keményszertergálásánál a felszíni réteg jelentős hő- és mechanikai igénybevételt szenved. Ennek következtében a megmunkált anyagnak a felületi integritása észrevehetően megváltozik.

Adott megmunkáló rendszerben az érdességet a forgácsolási adatok (v_c , a_p , f) és a szerszám hátkopása (VB_c) befolyásolja. Hatásuk vizsgálatára külső-, belső-, sík és kúpfelületeket munkáltunk meg változó értékeik mellett és mértük a megmunkált felületek érdességét.

A 2D-s érdességi paraméterek közül hét paramétert, a ferdeséget, a lapultságot, valamint a hordozóhossz nagyságát mértük. Megállapítottuk, hogy keményszertergálással is biztosítható az előírt érdesség. Sőt általános az is, hogy az esztergálással kedvezőbb érdesség érhető el, mint a köszörüléssel. Kivételt képez az R_a és R_q , amelyek kissé nagyobbak, mint köszörülésnél.

A ferdeség tekintetében a köszörült felületeken a textúra negatív, az esztergált felületeken pozitív előjelű. Köszörülésnél $R_p < R_v$ és $R_p/R_t < 0,5$, ami azt jelenti, hogy a textúra telt, az érdességi csúcsok többsége a középvonal fölött helyezkedik el. Esztergálásnál a helyzet fordított: $R_p > R_v$ és $R_p/R_t > 0,5$, ami azt jelenti, hogy a textúra üres, az érdességi csúcsok többsége a középvonal alatt helyezkedik el. Az érdesség tervezhetőségére regressziós analízissel úgynevezett regressziós modellek készültek.

A felületek háromdimenziós szemlélete és a 3D-s paraméterek pontosabban tükrözik a valóságot, mint az egyetlen síkmetszeten alapuló úgynevezett érdességi profil, és a 2D-s paraméterek.

Összehasonlító mérésekből kiderült, hogy az átlagszámításon alapuló S_a és S_q 3D-s paraméterek lényegesen kisebbek, mint 2D-s megfelelőjük, viszont az amplitúdók hosszúságára épített paraméterek (S_p , S_v , S_t és S_z) alig kisebbek, mint 2Ds megfelelőjük.

Bemutattuk, hogy az érdesség vizsgálatánál a 2D-s paraméterek mellett igen fontos a 3D érdességi paraméterek vizsgálata. Igen értékes információk olvashatók le az esztergált/köszörült textúrák 3D-s felvételeiről és a hozzájuk tartozó hordfelületi görbékről. Megállapítható, hogy a barázdáltság teljesen szabályos és kifogástalan-e, vagy pedig hibák vannak rajta. Jól látszik a szerszámkopás, a

kicsorbulás, a rezgési nyom, a képlékeny alakítás (elkenődés), a rugalmas deformáció, stb. Ezek alapján sok eddig ismeretlen jelenségre is magyarázatot találtunk.

Jellegzetes és lényeges különbségeket tárnak fel esztergálás és köszörülés között a hordfelületi görbék, az úgynevezett Abbot-Firestone-féle görbék. A funkció paramétereiből (a magérdesség, az olajtartó képesség, a kezdeti kopás csúcstérfogata) pedig következtetni lehet az alkatrész működés közbeni viselkedésére, sőt várható élettartamára is.

Méréseink szerint a keményesztergált felületek pontossága, érdessége és integritása, ipari szintű biztonsággal eléri, vagy meghaladja a köszörülési minőséget. Van azonban néhány, minőséget befolyásoló paraméter, amelyekre továbbra is kiemelt figyelmet kell fordítani. Ilyen a szerszám hátkopása (a kopás intenzitása adott lapkahalmazon belül nem állandó), a szerszám élsugara (eltérései nem ismertek) és a fehér réteg kialakulása. Fehér réteg képződése ún. „normál” forgácsolási adatok mellett nem valószínű, de erőltetett forgácsolási adatok és/vagy nagy hátkopás és/vagy nagy élsugar kiválthatja azt.

Olyan összefüggéseket tártunk fel a forgácsolási adatok és a felületminőségi jellemzők között, amelyek beépíthetőek a forgácsolási folyamat matematikai modelljébe, és lehetőséget biztosítanak a munkadarab megfelelő tartósságát létrehozó technológiai feltételek alkalmazására.

6. A felszíni réteg mikrokeménysége

A hűtés – kenés elmaradása változásokat okoz a megmunkált felület minőségében. Edzett acéloknak nagysebességű esztergáláskor a felszíni réteg jelentős hő- és mechanikai igénybevételt szenved. Különböző technológiai adatok mellett köszörüléssel és esztergálással megmunkált alkatrészek felületi rétegét vizsgáltuk. Ismertettük a mérési eredményeinket, elemeztük a mikrokeménység – olykor jelentős – megváltozásának körülményeit és okait és összehasonlítást tettünk a köszörülési eredményekkel. [11, 19, 20, 29, 30, 54]

A munka során vizsgáltuk betétedzett alkatrészek megmunkált felületi rétegében a mikrokeménység változását is. A nagy forgácsolóerő és magas kontakthőmérséklet hatására a munkadarab felszíni rétege számottevő hő és mechanikai igénybevételt szenved. A hő és erő egyidejű fellépése képlékeny alakváltozást okoz, amely elsősorban a forgácstőre lokalizálódik, és forgácsképződéshez vezet. Azonban az anyag folytonossága következtében a hatás áttérjed a második és harmadik nyírási zónára is, miáltal a megmunkált felszíni réteg is érintetté válik. A 800...1000 °C-nyi hőmérséklet meghaladja az acél A_{c3} allotrop átalakulási hőmérsékletét, és ez már szükségképpen változásokat okoz a felszíni réteg mikroszerkezetében. Egy meghatározott rétegmélységben az eredeti keménységet meghaladó nagyobb keménységű réteg jön létre. Vizsgálatainkat betétedzésű 16MnCr5 és 20MnCr5 jelű anyagon végeztük, és a felkeményedett réteget minden munkadarabon kimutattuk. Sőt nemcsak a furatban, hanem a homlokfelületeken és külső kúpfelületen is. A mikrokeménységnek ilyen jellegű megnövekedése eltér a furatköszörülési tapasztalatoktól, ahol a felszín közeli pontokban lágyulás történik, majd felkeményedés következik, csak ezután csökken a keménység az alapkeménység szintjére.

A felkeményedett rétegmélység 0,1 mm, a keménység növekedés pedig mintegy 100...150 HV. A jelenségből arra lehet következtetni, hogy a hőmérséklet eléri, vagy meghaladja az ausztenit-képződés hőmérsékletét, amit a jelentős lehűlési sebesség miatt újraedződési folyamat követ. Magas hőfokú tömeg adott pillanatban kis terjedelmű, de gyorsan mozgó hőforrásként a teljes felületet érinti. A szövetszerkezet úgy alakult át, hogy az eredeti bainit-martenzites szövetben több lett a martenzit a bainit kárára. E szövetváltozásnak lehetnek még további kihatásai az integritásra, mivel az újraedződést nem követi megeresztés és a maradó feszültségek megnövekedhetnek. A vázolt jelenség elkerülhetetlen, mert alacsonyabb hőmérsékleten a PCBN szerszám nem forgácsol optimálisan.

Olyan összefüggéseket tártunk fel a forgácsolási adatok és a felületminőségi jellemzők között, amelyek beépíthetőek a forgácsolási folyamat matematikai modelljébe, és lehetőséget biztosítanak a munkadarab megfelelő tartósságát létrehozó technológiai feltételek alkalmazására.

7. Fehér réteg kialakulásának vizsgálata

Kiemelt kutatási cél volt az ún. fehér réteg megjelenésének, illetve elkerülésének felderítése. Vizsgáltuk, hogy a köszörüléskor jellemzően kialakuló ún. fehér réteg kialakul-e keményesztergáláskor is, s ha igen, milyen feltételek mellett. A forgácsolási adatok széles tartományában végeztünk forgácsolási kísérleteket, minden adat párra csiszolatokat készítettünk, számos szövetszerkezeti mikroszkópi felvételt készítettünk és elemeztük a felület alatti réteg szövetszerkezetét. [10, 11, 28, 29, 30, 54]

A keményesztergálás során a nem kívánatos „fehér réteg” kialakulása befolyásolható a forgácsolási paraméterek módosításával és a forgácsolt anyag tulajdonságainak vagy szövetszerkezetének

megváltoztatásával. Ez utóbbi esetben a tulajdonságmódosító technológia megtervezése szempontjából fontos a „fehér réteg” szövetszerkezetének, kialakulási folyamatainak, és a kapcsolódó anyagszerkezeti változásoknak a megismerése.

Keményesztergálásnál a forgácsolási alakítás igen gyors, így az eközben bekövetkező felhevülés igen rövid idő alatt megy végbe. A mikroszkópi felvételek szerint a megmunkált felületen más jellegű szövetszerkezet van, mint az anyag belsejében. Esetenként egy igen vékony sávban ki alakul az úgynevezett fehér réteg. Ennek az eltérő szerkezetű szövetelemnek, a vizsgálatával foglalkoztunk. A 16MnCr5 és a 20MnCr5 anyagminőségű fogaskerék furatainak befejező megmunkálását végeztük el különböző forgácsolási adatokkal. A rétegvastagságot a számítógépes képelemzés módszerével mértük.

A fehér réteg fázisait röntgendiffrakcióval határoztuk meg. A fehér réteg igen nagy arányban α fázisból áll, amely minden bizonnyal martenzit; ezt bizonyítja a mellette levő ausztenit fázis jelentős mennyisége. Az α csúcsok torzultsága erőteljes, amely nagy rácshiba sűrűség következménye. A torzultság és az ausztenit jelenléte bizonyítja, hogy a felszín az A_{c3} fölé hevült, majd onnan igen gyorsan lehűlt, miközben jelentős képlékenyalakítás és sajátos rekrisztallizáció történt. Köztudott, hogy a rekrisztallizáció diszlokáció sűrűség növekedéssel jár, ami viszont jelentős keménységnövekedést von maga után. A felvett diffraktogramok a betétben edzett 16MnCr5 acélon α -kristály sűrűsödését és ausztenit rácok visszamaradását mutatták ki.

A felszíni réteg integritása durván károsodhat, ha a szakirodalom szerint „fehér réteg”-nek nevezett metallurgiai képződmény alakul ki a felszínen. A fehér réteg rendkívül kemény és rideg, marószerekkel nem maratható, így fénymikroszkópon nem elemezhető, vastagsága maximum 10 μm . Létezése káros és nem kívánatos, mert ridegsége folytán a mechanikai terheléseket (húzó, hajlító, csavaró, stb.) elviselni nem képes, ezek hatására berepedezik. Egyesek a túlzott hátkopással (VB_c), mások a nagy élsugárral (r_β), ismét mások a túl magas vágósebességgel (v_c) hozták összefüggésbe, de egyik sem vezetett eredményre. A fehér réteg kialakulását valószínűleg a felszín túlzott hőterhelése okozza, amit a hátfelület fajlagos súrlódási teljesítményével (P'_α [W/mm]) lehet kifejezni. Kísérleteink eredménye egyezik azzal a tapasztalattal, miszerint ha P'_α a 150 W/mm-t nem haladja meg, nem jelenik meg a fehér réteg. A kutatások jelenlegi állása szerint ez lehet az az elméleti paraméter, amely határt szab a fehér réteg keletkezésének.

8. A felületi réteg nem kívánatos változásait kizáró feltételrendszer megadása.

Meghatároztuk azokat a konkrét forgácsolási feltételeket, amelyek között a működés szempontjából kedvezőtlen fehér réteg megjelenése elkerülhető. Kidolgoztuk azokat az összefüggéseket, amelyek segítségével – a vizsgált technológiai tartományban – a megmunkált felületi réteget terhelő egységnyi hosszra vonatkoztatott hőteljesítmény (fajlagos hőteljesítmény) alapján meghatározhatóak azok a forgácsolási adatok, amelyeknél a fehér réteg megjelenhet. [10, 11, 28, 29, 30, 45, 55]

A felületi rétegben előforduló káros folyamatok elkerülésének feltételeinek meghatározásához kísérleteket végeztünk a forgácsolóerő, a hátkopás, a hőtani jellemzők és a felületi réteg változás kapcsolatának feltárására. Kétségtelen, hogy kis anyagleválasztási sebességnél (simítás) ugyan csekély valószínűsége van fehér rétegképződésnek, de nem kizárt. Nagy élsugár és nagy hátkopás esetén fordulhat elő. Bizonyos az is, hogy a hátkopás jelentős mértékben segíti elő a fehér réteg-képződést, de olyan hátkopási mértéket nem lehet megfogalmazni, amely általános fehér réteg megjelenési kritérium lenne. Ezzel szemben megbízható kritériumnak bizonyult a Brandt-Schmidt féle hátfelületi súrlódási teljesítmény, és annak számértéke. Ha a hosszra vonatkoztatott hőteljesítmény (P'_α) eléri a 150 W/mm-t, akkor ez az edzett acélok keményesztergálásakor előidézi az ún. fehér réteg megjelenését, mely csökkentheti az alkatrész élettartamát. Kísérleti úton meghatároztuk a forgácsleválasztás során fellépő erőket, az egységnyi hosszra vonatkoztatott hőteljesítményt, mely a munkadarab felületi rétegét terheli. Megállapítottuk, hogy - az alkalmazott technológiai adatok mellett - az egységnyi hosszra vonatkoztatott hőterhelés nem éri el a 150 W/mm-es határértéket, így a kiinduló feltételek alapján nem jelenik meg fehér réteg. Ezen állítás érvényességét csiszolatokon is ellenőriztük. Meghatároztuk azokat a konkrét forgácsolási feltételeket, amelyek között várható a fehér réteg megjelenése. A kidolgoztuk azokat az összefüggéseket, amelyek segítségével – a vizsgált feltételek mellett – a megmunkált felületi réteget terhelő egységnyi hosszra vonatkoztatott hőteljesítmény alapján meghatározhatóak azok a forgácsolási adattartományok, ahol a fehér réteg megjelenhet.

9. Módszer a megengedett szerszámkopás meghatározására, az előírt érdesség alapján

Kifejlesztettük egy módszert, melynek lényege, hogy az alkatrészraizon előírt érdességi jellemzők megengedett értékének figyelembevételével adjuk meg a forgácsoló-szerszám megengedett kopását. Az élettartam kritérium így valamely előírt érdességi jellemző, de ismert lesz a szerszámkopás megengedett értéke

is. Ezáltal minden korábbi összefüggés is alkalmazható, amely a szerszám hátkopásával volt kapcsolatban (összefüggésben). Ezzel a módszerrel tárcsaszerű alkatrészekre, különböző érdességi értékekre és különböző specifikációjú szerszámokra határoztuk meg a szerszámok éltartamát. [2, 5, 9, 18, 30, 48, 49]

A forgácsolószerszámok kopása jelentősen függ a technológiai adatoktól. A kopás nagysága befolyásolja a forgácsleválasztás folyamatát, de hatással van a munkadarab méret és alakpontosságára, valamint a megmunkált felület minőségére is. Ezért a kopás pontos tervezhető ismeretére van szükség, ami az elméleti eredmények mellett fontos gyakorlati előnyökkel is jár. Például a szerszámkorrekció prognosztizálásához vagy keménysztergáló gyártócella automatikus állapot-felügyeleti rendszerének megvalósításához. Ezért megfelelő kopás és éltartam modell kidolgozását végeztük el.

A kísérleti eredmények azt mutatták, hogy keménysztergáláskor akkor tekinthető élesnek a szerszám, amíg az érdességi előírások teljesülnek. Ezen kopásértékig az alkatrész pontossági előírásai is teljesülnek. A szerszámok kopása és éltartama precíziós és ultraprecíziós forgácsolásnál nagyobb jelentőséggel bír, mint az átlagos minőségterományban. Nagy értékű szuperkemény szerszámanyagokkal gyakran nagy értékű alkatrészek megmunkálását végezzük, ugyanakkor az előírt pontossági és minőségi követelmények csak a szerszámkopás kis mértékéig teljesíthetők. Ezért eltérően a korábbi kopási- és éltartam modellektől, amikor az éltartam kritériumot jellemzően a megengedett hátkopással adták meg ezen befejező megmunkálásokra, az érdességi mérőszámokat tekintettük kritériumnak. Ez azért indokolt, mert precíziós megmunkálásoknál a szerszám éltartama csak az alkatrészraizon előírt felületminőségi jellemzőkkel, gyakorlatilag valamely érdességi mérőszám (R_a , R_z) értékével, a pontossági előírások betartása mellett értelmezhető. Kidolgoztunk egy módszert, amelynek lényege, hogy az alkatrészraizon előírt érdességi jellemzők értékének figyelembevételével adjuk meg a forgácsoló-szerszám megengedett kopását. Ennek lényege a következő:

- Meghatároztuk a szerszám hátkopásának függését a megmunkált darabszámtól (vagy forgácsolási időtől, vagy forgácsolási úttól).
- Meghatároztuk a megmunkált felület érdességének változását a darabszám függvényében.
- A két összefüggést egy diagrammban ábrázolva, az alkatrészen előírt érdesség alapján a meghatározzuk a megmunkálható darabszámot, illetve ehhez a darabszámhoz tartozó szerszámkopás mértékét.

Az éltartam kritérium így az R_z , de ismert lesz a szerszámkopás megengedett értéke is.

Ezáltal minden eddigi összefüggés továbbra is alkalmazható, amely a szerszám hátkopásával volt kapcsolatban. Ezzel a módszerrel tárcsaszerű alkatrészekre, különböző érdességi értékekre és különböző specifikációjú szerszámokra határoztuk meg a szerszámok éltartamát.

10. Kritériumrendszer a megmunkáló eljárás megválasztásához

A folyamatjellemzők vizsgálati eredményeire alapozott kritérium rendszert és döntési algoritmust dolgoztunk ki a befejező megmunkálási eljárás megválasztásához. [19, 20, 24, 25, 26, 27, 34, 39, 45, 46, 47, 50, 52]

A keménysztergálást köszörülés helyett csak bizonyos feltételek teljesülése esetében lehet alkalmazni. A szárazmegmunkálás folyamatjellemzőinek feltárása/megismerése után az eljárásválasztáshoz döntési kritériumként a befejező megmunkálások alkalmazhatóságát leginkább befolyásoló tényezőket vettük figyelembe. Ezeket az alábbi csoportokba lehet besorolni:

- a munkadarab alakja és méretei,
- a megmunkálendő felületek nagysága és folytonossága,
- a szerszámgépre való felfoghatóság,
- az előírt pontossági és érdességi jellemzők,
- az előírt helyzet-, és alakhibák,
- az anyag keménysége és a ráhagyások nagysága.

Meghatároztuk mindkét eljárásra ezen csoportok jellemző értékeit és kidolgoztuk a döntési algoritmust a megmunkáló eljárás megválasztásához ill. a keménysztergálás alkalmazásáig. Az algoritmus egyértelmű döntést tesz lehetővé, hogy adott esetben alkalmazható-e a keménysztergálás vagy sem. Az algoritmus alapján készíthető számítógépi program segítségével lényegesen lerövidíthető és biztonságossá tehető a döntési folyamat.

A kritériumrendszert konkrét értékek mellett tárcsaszerű alkatrészekre, a keréktest edzett felületeinek megmunkálására alkalmaztuk. A kritériumrendszer alapján készülő algoritmusban minden döntés konkrét számadatok alapján történik, ezért a bemenő adatok száma elég nagy, de minden adat megtalálható az alkatrész műhelyrajzán.